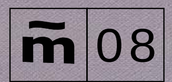
Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

PROCEDIMIENTO EL- 002 PARA LA CALIBRACIÓN DEL PUENTE NUMÉRICO PARA LA MEDIDA DE INDUCTANCIA, CAPACIDAD Y RESISTENCIA





MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Este procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, si ha sido necesario.

La presente edición se emite en formato digital. Hay disponible una edición en papel que se puede adquirir en nuestro departamento de publicaciones.

Este procedimiento de calibración es susceptible de modificación permanente a instancia de cualquier persona o entidad. Las propuestas de modificación se dirigirán por escrito, justificando su necesidad, a cualquiera de las siguientes direcciones:

Correo postal
Centro Español de Metrología
C/ del Alfar, 2,
28760 Tres Cantos, Madrid

Correo electrónico
cem@cem.es

ÍNDICE

Página

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de puentes numéricos para la medida de inductancia, capacidad y resistencia. Según la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [1], se identifican como EE – 13.01 .

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la calibración de puentes de medida en sus funciones de inductancia, capacidad y resistencia (parte imaginaria para inductancia y capacidad y parte real para resistencia). Lógicamente este procedimiento también será aplicable a instrumentos que midan solamente una o dos de las magnitudes anteriores.

No es objeto de este procedimiento la calibración de las funciones de factor de calidad (Q) o factor de perdida (d). Para la calibración de estas funciones es necesario disponer de los llamados patrones Q calibrados.

En este procedimiento la calibración se realizará mediante la aplicación al instrumento de patrones de referencia de valores conocidos. La incertidumbre de calibración dependerá fundamentalmente de la incertidumbre con la que se conocen los valores de referencia. Será aplicable a todos los equipos en los que se obtenga la incertidumbre requerida.

Algunos puentes pueden realizar las medidas a distintas frecuencias. En este procedimiento se supone que la frecuencia de operación es fija. Para aplicar este procedimiento al caso de que la frecuencia de operación sea variable, será necesario realizar para cada función un barrido en frecuencia. Lógicamente los valores de los patrones han de ser conocidos a todas las frecuencias de aplicación.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [5] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Puente numérico para la medida de inductancia, capacidad y resistencia [1]

Instrumento activo que mide de forma directa o por comparación inductancias, condensadores y resistencias.

Ajuste (de un sistema de medida) [5] (3.11)

Conjunto de operaciones realizadas en un sistema de medida de forma que este mida dentro de sus especificaciones.

NOTA 1 Los ajustes pueden se de “cero”, “offset” y ganancia

NOTA 2. No debe confundirse ajuste con calibración.

NOTA 3 Después del ajuste es necesaria una recalibración

Calibración [5] 2.39

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, en un primer paso, la relación entre los valores de unos patrones con sus incertidumbres y las indicaciones correspondientes con las incertidumbres de medida asociadas, y en un segundo paso utiliza esta información para establecer una relación que permite obtener un resultado de medida de una indicación.

NOTAS

1 La incertidumbre de medida necesariamente aumenta con las secuencias de calibración.

2 Los elementos de la cadena de calibraciones son los patrones y los sistemas de medida de acuerdo a procedimientos de medida

3 De acuerdo a esta definición la "referencia" puede ser, la definición de una unidad mediante su realización práctica, un procedimiento de medida o un patrón

4 Una comparación entre dos patrones puede ser considerada como una calibración, si la comparación se utiliza para comprobar, y en caso necesario corregir el valor y las incertidumbres de medida atribuidas a uno de los patrones

<u>Incertidumbre de medida</u> [5] 2.26

Parámetro no negativo, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando, basado en la información utilizada.

NOTAS

1 La incertidumbre de medida incluye las componentes debidas a efectos sistemáticos, como pueden ser los asociados a correcciones, a los valores asignados a los patrones, o a la incertidumre de definición. En algunas ocasiones en lugar de corregir los errores sistemáticos, se incorporan como componentes de incertidumbre asociadas a los mismos.
2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.

3 La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones estándar experimentales (evaluación tipo A). Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones (Evaluación tipoB)
.



4 Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

Resolución (de un dispositivo visualizador) [5] (4.15)

La menor diferencia de indicación de un dispositivo visualizador que puede percibirse de forma significativa.

Impedancia (impedancia compleja) Z [6]:

La representación compleja de la diferencia de potencial dividida por la representación compleja de la corriente.

$$Z = IZI\ ej\varphi = R + jX$$

Modulo de la Impedancia [6]:

Se define por la siguiente ecuación:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Resistencia en corriente alterna R [6]:

Parte real de la impedancia.

Reactancia X [6]:



Parte imaginaria de la impedancia.

Para una reactancia inductiva ; $X = \omega L$
Para una reactancia capacitiva; $X = -1/\omega C$
Siendo ω la frecuencia angular ; $\omega = 2\pi f$

Admitancia Y (admitancia compleja) [6]:

Se define como la inversa de la impedancia

$$Y = 1/Z \; ; \; Y = |Y| e^{-j\varphi} = G + jB$$

Modulo de la admitancia IYI [6]:

Se define como:

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

Conductancia G [6]:

Parte real de la admitancia.
Susceptancia B [6]:

Parte imaginaria de la admitancia.

Factor de calidad Q [6]:

Para sistemas no radiantes si $Z = R + jX$ se define Q como $Q = |X|/R$

Factor de pérdida d [6]:

Se define como la inversa del factor de calidad.

$d = 1/Q$

4. GENERALIDADES

4.1. Abreviaturas

Puente LCR: Puente para la medida de inductancia, capacidad o resistencia.

L : Inductancia.

C : Capacidad.

R : Resistencia.

Q : Factor de calidad.

d : Factor de pérdida.

4.2. Consideraciones generales

Los puentes de medida LCR son instrumentos con capacidad para la medida de Inductancia, Resistencia y Capacidad. Normalmente también disponen de capacidad para la medida del factor de calidad (Q) o de su inversa el factor de perdida (d). Aunque estos dos últimos no son objeto del presente procedimiento, su valor en los patrones aplicados ha de ser considerado, ya que en la mayoría de los puentes LCR su precisión de medida esta limitada por el valor de Q del patrón aplicado.

El sistema básico de funcionamiento de un puente LCR esta constituido por un generador de señal senoidal, a una frecuencia o frecuencias conocidas (E j:1 kHz) un medidor de tensión alterna, un medidor de corriente alterna, y un convertidor analógico digital. La corriente generada es aplicada en los terminales de corriente del patrón a medir y la tensión generada en los terminales de potencial del mismo es medida por el medidor de tensión alterna. La medida de la corriente aplicada al patrón se realiza aplicando la misma a un patrón de resistencia interno, y midiendo la caída de tensión en esta. Las señales de los medidores de corriente y tensión se aplican a un convertidor analógico digital. Las medidas se realizan de forma síncrona con el generador de señal para que pueda obtenerse la medida de fase.

La calibración se realiza por un método directo, consistente en la comparación de la medida obtenida con el instrumento a calibrar sobre patrones de referencia conocidos y los valores certificados de estos.

Al no ser las impedancias resistencias o reactancias puras, se representan, para una frecuencia determinada, por una combinación serie o paralelo de resistencia y reactancia. A esta representación se le llama circuito equivalente. Los valores asignados dependen del circuito equivalente elegido, serie o paralelo.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer de los siguientes instrumentos:

- Inductancias patrón.
- Condensadores patrón.
- Resistencias patrón.
- Caja de décadas de inductancia.

- Caja de décadas de condensadores.
- Caja de décadas de resistencia.

Los valores necesarios dependerán del margen de funcionamiento o de utilización del puente numérico a calibrar, en general han de ser los necesarios para realizar la calibración en los puntos descritos en el apartado 5.3.2.

Nota: Todos los patrones utilizados en la calibración han de tener valores conocidos y trazados a la frecuencia o frecuencias de operación del puente. De estos patrones será necesario conocer el circuito equivalente que los representa, el valor de la parte real para el caso de resistencias, el valor de la parte imaginaría para las inductancias y condensadores. También es necesario conocer el factor de calidad (Q) o factor de perdida (d) de los patrones a aplicar o tener una cota de ellos

- Los adaptadores necesarios para conectar los patrones al puente cuando estos utilizan distinto tipo de conectores. Por ejemplo el puente utiliza conectores BNC y los patrones terminales coaxiales del tipo 874.

- Los cables necesarios para conectar los patrones al puente numérico. Estos serán los de utilización del puente numérico u otros que cumplan con las características indicadas en su manual de utilización.

5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se realizarán las siguientes operaciones previas:

a) Se comprobará que el puente está identificado de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno del propietario unívoco. Si no fuera así se le asignará un código de identificación que se adherirá o fijará de forma segura sobre el instrumento. También se comprobará que se dispone de los adaptadores y cables necesarios para realizar la conexión de los patrones al puente y que estos están identificados. Lo idóneo es realizar la calibración con los mismos cables de utilización del puente.

b) Se estudiará el manual de operación del puente a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con su manejo. Si se tiene la capacidad para realizar el ajuste, normalmente es necesario disponer de las instrucciones de ajuste del fabricante, por si en el transcurso de la calibración se determinara la necesidad de realizar el mismo.

c) Se fijará cuál es la tolerancia de uso asignada al puente, pudiendo coincidir con las especificaciones del fabricante, o estar calculada en función del uso concreto al que se destina, Los errores obtenidos en la calibración se compararán con esta tolerancia permitida de forma que siguiendo los criterios del apartado 5.3.1 se determinará la necesidad o no de realizar ajustes.

d) Se comprobará el estado de calibración de los patrones a utilizar, si disponen de un certificado de calibración en vigor, y si dicho certificado garantiza la trazabilidad e incertidumbre apropiadas a las medidas que se van a realizar en el transcurso de la calibración a la frecuencia o frecuencias de utilización del puente. Se dispondrá también, cuando sea necesario, de las

correcciones a aplicar a los valores de los patrones debidas a la deriva desde la última calibración.

e) Situar el instrumento a calibrar y los patrones a utilizar alejados de cualquier fuente de calor o de otros instrumentos que puedan producir interferencias electromagnéticas. Situar los instrumentos de forma que no se obstruyan o dificulten las salidas de refrigeración y que ninguna de esta incida sobre otro instrumento. Las corrientes capacitivas formadas con las superficies conductoras próximas pueden afectar las medidas. Los patrones inductivos pueden verse afectados por objetos permeables al campo magnético (tales como componentes de acero), variando su inductancia. En general mantener una distancia del orden de dos metros a las superficies conductoras y a objetos permeables al campo magnético y prestar especial cuidado a los materiales con los que esta fabricado el mobiliario del laboratorio. Para este tipo de medidas se recomienda la utilización de muebles de madera evitando la utilización de clavos y tornillos

f) Se comprobará que el valor nominal de la tensión de alimentación y las posibles variaciones son adecuadas para el funcionamiento del instrumento a calibrar.

h) Se conectará a la red de alimentación eléctrica el instrumento a calibrar, en los casos en que éste disponga de conexión a red, durante un tiempo previo al inicio de la calibración, para conseguir la estabilización térmica. El tiempo de estabilización térmica cambia de un instrumento a otro, y viene indicado por su fabricante en su manual de utilización.

i) Los patrones que se van a utilizar en la calibración deberán permanecer previamente en las condiciones ambientales de utilización durante el tiempo suficiente para que se adapten a las mismas. Como regla general se recomienda que se sitúen en el lugar de calibración con 24 horas de antelación. Si los patrones disponen de recintos termostáticos controlados, estos deberán permanecer encendidos previo al inicio de la

calibración el tiempo suficiente para que se alcance la estabilidad térmica.

j) Verificar que las condiciones ambientales del laboratorio están dentro de las condiciones de funcionamiento del puente y de los patrones a utilizar en la calibración. Para los puentes los limites de temperatura en los que se obtienen las mejores especificaciones de medida varían de unos a otros dependiendo de la influencia de la temperatura ambiental sobre los patrones de referencia internos. Variando los intervalos de temperatura desde $\pm$ 1 °C a $\pm$ 5 °C.

5.3. Proceso de calibración

5.3.1. Secuencias posibles de calibración

El proceso de calibración seguirá una de las tres secuencias descritas a continuación:

1) Calibración inicial.
   Ajustes.
   Calibración final.

2) Calibración sin ajustes.

3) Ajuste.
   Calibración final.

La secuencia 1), es la secuencia normal: primero se realiza una calibración inicial, y si como consecuencia de esta primera calibración el equipo requiere ajuste, se realiza dicho ajuste seguido de una calibración final. De esta forma la primera calibración nos proporciona información del estado del instrumento antes de realizar el ajuste. Esta información es muy importante ya que de ella se puede verificar por comparación con la calibración anterior o anteriores, la estabilidad del instrumento. También sirve para verificar que el instrumento se mantiene dentro de las

especificaciones establecidas durante el periodo de tiempo asignado entre calibraciones. La calibración final comprueba que los ajustes realizados son correctos y nos asegura la trazabilidad. En este caso se conservarán registros tanto de la calibración inicial como final.

Nota: Debe consultarse siempre con el cliente o responsable del equipo si este desea que se realice el ajuste. Esto es especialmente importante en los instrumentos en los que el ajuste se realiza mecánicamente ya que el mismo puede afectar a la estabilidad o deriva del instrumento.

La secuencia 2) se puede considerar como una variante de la secuencia 1) aplicable cuando los errores encontrados en la calibración inicial sean inferiores a unos límites establecidos, o cuando el responsable del equipo a calibrar no requiere el ajuste.

La secuencia 3) solamente se debe aplicar cuando el estado del puente antes de la calibración no sea importante, por ejemplo porque se acaba de reparar, porque es nuevo, porque estaba previamente fuera de uso, etc.

Se deberán establecer en función del uso previsto para el puente, unos límites de tolerancia a partir de los cuales se realizará el ajuste del instrumento o se limitará el uso del mismo. Se procederá al ajuste cuando la desviación obtenida sea mayor que el límite de tolerancia establecido disminuido en la incertidumbre de calibración.

Los ajustes se deben realizar, siempre que se disponga de capacidad para ello, siguiendo el manual del fabricante, en el orden y en los puntos indicados. En algunos instrumentos, el ajuste de todas las funciones se realiza mediante un proceso, en el que se aplican sucesivamente unos valores especificados de resistencia de los cuales es necesario conocer el valor de su resistencia y su factor de calidad (Q). Si no se dispone de los patrones correspondientes puede

utilizarse la década de resistencias siempre que se conozcan estos valores en los puntos de ajuste.

5.3.2. Puntos de calibración

Al no ser posible realizar la calibración en la infinidad de puntos posibles del instrumento esta hay que limitarla a un número de puntos, que garantice de forma razonable la trazabilidad del instrumento en todas las funciones y campos de utilización.

Si el instrumento se destina a una única aplicación determinada, la cual requiere realizar medidas en una serie de puntos especificados, la calibración más apropiada será en estos puntos, quedando el uso del instrumento limitado a dicha aplicación.

De forma general se recomienda realizar la calibración en los entornos de los siguientes puntos:

Para todos los campos de cada función realizar la calibración en dos puntos (fondo de escala y al 10% del mismo).

Para un campo intermedio de cada función, verificar la linealidad del instrumento realizando la calibración en el 10%, 25%, 50 % 75% y 100 % del fondo de escala.

En la siguiente tabla se resumen estos valores:

Tabla : Puntos de calibración

CAMPOS	Nº DE PUNTOS	VALORES DE PRUEBA (% FONDO DE ESCALA)
RESISTENCIA		
TODOS	2	10 %, 100 %
UN RANGO INTERMEDIO	5	10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %
INDUCTANCIA		
TODOS	2	10 %, 100 %
UN RANGO INTERMEDIO	5	10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %
CAPACIDAD		
TODOS	2	10%, 100 %
UN RANGO INTERMEDIO	5	10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %

5.3.3. Realización de las medidas

La calibración se realizará conectando, mediante los cables de conexión adecuados, los patrones al instrumento de medida.

a) Realización del cero.

Antes de iniciar las medidas ha de realizarse la función “Cero“ del instrumento. Esta operación tiene por objeto corregir los posibles errores debidos a la influencia de los cables y adaptadores en la conexión de los patrones al puente de medida. Una vez realizado este ajuste, en puentes de precisión elevada, se recomienda incluso no variar la posición de los cables de medida. Esta función se realizará de acuerdo a lo indicado en el manual técnico del puente numérico y consiste en la aplicación de un cero y en algunos casos también un abierto. La

realización del “Cero” es común para todas las funciones de medida.

Mediante esta operación estos valores son memorizados por el puente y utilizados posteriormente para realizar correcciones.

Si el puente numérico no dispone de esta función, antes de realizar la calibración de cada magnitud, debe aplicarse un corto al final de los cables o cortocircuitar los extremos de los mismos, realizar diez lecturas y anotarlas en la hoja de toma de datos. En este caso, estas se utilizarán para corregir los valores de los patrones aplicados al puente.

b) Para cada función Resistencia, Capacidad e Inductancia, aplicar sucesivamente al puente los patrones correspondientes a los puntos de calibración establecidos.

- Realizar las conexiones a dos, tres o cuatro terminales según proceda. Para realizar las conexiones seguir las indicaciones del manual del puente numérico asegurándose que la conexión es la correcta.

- Si el puente dispone de la posibilidad de variar sus condiciones de medida, tales como tiempo de integración, resolución etc, y el cliente o responsable del equipo no ha solicitado una configuración determinada, seleccionar las correspondientes a las mejores especificaciones de medida del instrumento. Anotar esta configuración en la hoja de toma de datos, y, en su caso, en el informe /certificado de calibración.

- Si el puente dispone de la posibilidad de variar los parámetros de medida del circuito equivalente que

representa, serie o paralelo, verificar que el parámetro que esta midiendo corresponde a la misma configuración con la que se conoce el patrón que se está aplicando, normalmente serie. Anotar en la hoja de toma de datos y, en su caso, en el informe/certificado de calibración, que las lecturas corresponden a esta configuración.

- Al aplicar cada patrón de calibración al puente, antes de anotar medidas esperar el tiempo suficiente para que se estabilice la lectura. La lectura se habrá estabilizado cuando no existan variaciones en la misma o si existen, normalmente en torno al último dígito, estas fluctúen en el entorno de un valor.

- Para cada punto de calibración realizar diez lecturas y anotarlas en la hoja de toma de datos. Si una vez estabilizada la lectura no existe variación en la indicación del puente no es necesario anotar las diez lecturas. Si la variación de la lectura es pequeña (del orden de uno o dos dígitos), la resolución del puente numérico no es suficiente para apreciar la dispersión. En este caso, se anotará el valor medio aproximado de las diferentes lecturas observadas y anotar a continuación los límites de variación de las mismas en función del número de dígitos de la cifra menos significativa, de forma que todas las lecturas estén dentro de esos límites. Por ejemplo 0,999 92 H ± 1d cuando todas las lecturas están entre 0,999 91 H y 0,999 93 H.

c) Restar al valor leído por el puente, el valor del patrón aplicado y verificar que la diferencia esta dentro de los límites establecidos en el apartado 5.2.c. Si se ha realizado el corto descrito en el apartado a), restar al valor leído por el puente la lectura correspondiente a este corto.

d) Realización del cero. Si el puente no dispone de la función “cero” volver a aplicar una vez finalizadas todas las medidas de una determinada magnitud el corto al final de los cables y verificar que la posible variación en la lectura del puente numérico es despreciable comparada con las especificaciones del puente. Por ejemplo si la especificación del puente para esa función de medida es de (0,01%+ 1 d), las variaciones de la lectura deben ser del orden del último dígito.

Nota: En el caso de que la variación sea significativa se revisarán las conexiones y el funcionamiento del equipo por si fuera necesario proceder a su ajuste o reparación. Si no fuera necesario este ajuste o reparación la variación obtenida en el “cero“deberá considerarse en el calculo de incertidumbres.

e) Si fuese necesario, en función de los valores obtenidos en el apartado 5.3.3 c) y considerando lo requerido por el responsable del equipo a calibrar, o por el cliente, si se trata de una calibración externa, realizar el ajuste siguiendo las indicaciones del manual técnico y volver a repetir la calibración.

5.4. Toma y tratamiento de datos

En la hoja de toma de datos anotar lo siguiente:

- Fabricante, modelo y número de serie del instrumento.
- Patrones utilizados en la calibración.
- Fecha o fechas de realización de la calibración.
- Persona que realiza la calibración.
- Condiciones ambientales.
- Cables utilizados para conectar los patrones al instrumento.
- Indicación de que se ha realizado el “cero “o la lectura correspondiente a un corto, antes y después de la calibración, y valor medio.
- Frecuencia a la que el instrumento realiza las medidas.

Para cada punto de calibración se dejará constancia escrita de forma inequívoca de los siguientes datos:

- Patrón aplicado al instrumento y su valor asignado.

  Nota: El valor asignado al patrón será el valor certificado corregido por todos aquellos factores que se consideren necesarios (deriva, influencia de la temperatura, etc.).

- Las lecturas obtenidas por el puente, la media y la desviación típica o los límites de variación de las mismas.

- Parámetros de medida seleccionados en el puente.

- Error asociado a la calibración en cada punto (diferencia entre la lectura del puente, corregida por el valor en el cero (media entre el valor al inicio y al final de la calibración de la función correspondiente) si el puente no dispone de la función “Cero” y el valor aplicado).

A continuación se compararán los errores obtenidos con las tolerancias asignadas al puente digital para determinar o no la necesidad de realizar ajustes, según los criterios del apartado 5.2.c.

Si es necesario realizar ajuste se anotarán las nuevas lecturas indicándose que estas corresponden a valores obtenidos después del ajuste.

Si la calibración se automatiza mediante el empleo de un ordenador, se registrarán además de los datos anteriores el programa y la versión utilizada para la realización de la calibración.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía EA-4/02 [2]. En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida (que es el error de lectura del puente en cada punto de calibración), en función de las distintas magnitudes de entrada.

$$e_X = Z_X + \delta Z_X - (Z_{Xo} + \delta Z_{X0}) - (Z_S + \delta Z_{SD} + \delta Z_{ST}) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

donde:

e_X : error de la lectura del puente en cada punto de calibración.
Z_X : lectura del puente cuando se aplica el patrón.
Z_{X0} : indicación del puente cuando se aplica un corto.
δZ_X : corrección debida a la resolución finita del puente cuando se aplica el patrón.
δZ_{Xo} : corrección debida a la resolución finita del puente cuando se aplica el corto.
Z_S : valor certificado del patrón.
δZ_{SD} : corrección del valor certificado por deriva.
$\delta Z_{S\,T}$: corrección del valor certificado debida a la influencia de la temperatura.

Nota:
δZ_X y δZ_{Xo} : Aunque puede haber otras magnitudes de influencia en el puente como la temperatura y la humedad, solo se ha considerado la resolución, debido a que generalmente los fabricantes establecen que su influencia es despreciable cuando están dentro de los márgenes especificados. Lo normal es que la calibración se realice dentro de estos márgenes. En caso de no ser así deberían considerarse estas componentes.

En el caso que el puente tuviese corrección automática del cero desaparecería el término $Z_{Xo} + \delta Z_{Xo}$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la expresión de e_x, suponiendo que no existe correlación entre las distintas variables, se obtiene:

$$u^2(e_x)=c_1^2u^2(z_x)+c_2^2u^2(z_{x0})+c_3^2u^2(\delta z_x)+c_4^2u^2(\delta z_{x0})+c_5^2u^2(z_s)+c_6^2u^2(\delta z_{SD})+c_7^2u^2(\delta z_{ST}) \quad \text{(Ecuación 2).}$$

Asignación de incertidumbres:

a. Incertidumbre de calibración $u(z_s)$: será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración. Puesto que en los certificados se indican incertidumbres expandidas (U_{certi}, con k=2), para hallar la incertidumbre típica será necesario dividir el valor indicado por el valor de k_{certi} (normalmente 2).

b. Incertidumbre asociada a la corrección por deriva del patrón

$u(\delta z_{SD})$: Esta componente es debida a la posible variación del patrón desde la última calibración. Si se dispone de un número suficiente de calibraciones del patrón, la corrección (δZ_{SD}) puede obtenerse mediante la recta de regresión, y estimar la incertidumbre típica estableciendo unos límites razonables en función de la bondad del ajuste de los puntos certificados a la recta ($\pm$D). D puede estimarse como la máxima variación de los puntos a la recta. La incertidumbre típica corresponderá a la de una distribución rectangular y su valor será $D/\sqrt{3}$.

Si no se corrige por deriva, D se estimaría como la máxima deriva histórica.

Si no se dispone de un número suficiente de calibraciones, se tomará el último valor certificado. La incertidumbre típica se estimará sobre la base de lo especificado por el fabricante en cuanto a estabilidad. Si el fabricante no especifica ese dato se tomará la especificación genérica del patrón dada por el fabricante. Para hallar la incertidumbre típica se supondrá una distribución rectangular dividiendo por tanto la especificación por $\sqrt{3}$.

c. Incertidumbre asociada a la influencia de la temperatura ambiente sobre el patrón u(δz_{ST}). Esta componente es debida a la incertidumbre con la que se conoce la temperatura a la que se encuentran los patrones. La temperatura suele estar determinada por un intervalo (Ej T °C ± ΔT °C), siendo T la temperatura de referencia. En el caso que la temperatura de referencia coincida con la temperatura a la que se conoce el patrón, la incertidumbre típica se hallará suponiendo una distribución rectangular y se determinará dividiendo por √3 el producto de multiplicar ΔT por el coeficiente de temperatura del patrón(α), es decir $((\Delta T \cdot \alpha)/\sqrt{3}) \cdot Z_S$.

Nota 1: Se ha supuesto que el valor de α se conoce en términos relativos al valor del patrón.

Nota 2: En el caso de que no coincida la temperatura a al que se conoce el patrón con la temperatura de calibración habrá que considerar la realización de una corrección por esta causa y la incertidumbre correspondiente asociada a la corrección.

Nota 3: Se ha supuesto que en las condiciones en que se realizan las medidas la influencia de la humedad sobre los patrones utilizados en la calibración es despreciable. En caso contrario habrá que considerar la realización de correcciones y la incertidumbre asociada a las mismas.

d. Incertidumbres debidas a la dispersión de lecturas del puente u(z_X) y u(z_{X0}). Se tomarán diez lecturas en las mismas condiciones de medida. Se calcularán los estimadores estadísticos que caracterizan la dispersión de los resultados obtenidos, (ver capítulo 3 de definiciones). En particular se calcularán la media aritmética de los valores de Z_X, la desviación estándar experimental, *s*(z_X), y la desviación estándar experimental de la media de Z_X.

Desviación estándar experimental $s(Z_x) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}{n-1}}$

Desviación estándar experimental de la media = $u(Z_X) = s(Z_X) / \sqrt{10}$

En el caso de que la variación de las lecturas sea muy pequeña (del orden de uno o dos dígitos) se tomarán los límites dentro de los que varía la lectura en el entorno de su valor medio en forma de dígitos, (±d), en lugar, de los diez valores individuales. La incertidumbre típica corresponderá a la de una distribución rectangular y su valor será $d/\sqrt{3}$. El valor de esta contribución se expresará en unidades homogéneas con el resto de contribuciones. Por ejemplo si al aplicar al puente 100 pF las lecturas varían entre 100,001 pF y 100,003pF. El valor sería 100,002 pF ± 1 d. La incertidumbre típica correspondiente a esta a contribución será $0{,}001\text{pF}/\sqrt{3}$.

Para los valores correspondientes al cero se operará de igual forma. En el caso que el instrumento no disponga de la función "Zero" y se hayan realizado las diez lecturas correspondientes a un corto, al inicio y al final de la calibración, como valor de cero se tomará el valor medio de las dos medias obtenidas. Como incertidumbre típica, representativa de la dispersión de las lecturas del cero, se tomará la mayor de las dos desviaciones típicas obtenidas.

Nota: Si la inestabilidad del cero no es despreciable se considerará la incertidumbre debida a la misma, normalmente como el semi-intervalo de la diferencia entre los dos valores dividido por $\sqrt{3}$.

e. Incertidumbre debida a la resolución del puente a calibrar. $u(\delta z_X)$ y $u(\delta z_{Xo})$. En ambos casos, se considera el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del puente como ± 1 veces el último dígito (Res.=1 dígito); la incertidumbre típica se hallará suponiendo una distribución rectangular y dividiendo por tanto por $\sqrt{3}$. El valor de estas se expresará en unidades homogéneas con el resto de contribuciones.

Balance de las componentes

Magnitud, X_i	**Estimación**	**Incer. Típica**	**Distribución de probabilidad**	**Coef.** (Nota 2)	**Contribución incertidumbre** (Nota 3)
Z_s	Z_s	Ucer/k	Normal	-1	$u_1(y)$
δZ_{SD}	δZ_{SD}	$D/\sqrt{3}$	Rectangular	-1	$u_2(y)$
δZ_{ST}	δZ_{ST}	$\Delta T \alpha Z_s/\sqrt{3}$	Rectangular	-1	$u_3(y)$
Z_x	$(Z_{x1}+\cdots+Z_{x10})/10$	$s(Z_X)/\sqrt{10}$	Normal	1	$u_4(y)$
Z_{X0} (Nota 1)	$(Z_{xo1}+\cdots+Z_{xo10})/10$	$s(Z_{Xo})/\sqrt{10}$	Normal	-1	$u_5(y)$
δZ_x	0	Res/$\sqrt{3}$	Rectangular	1	$u_6(y)$
δZ_{X0}	0	Res/$\sqrt{3}$	Rectangular	-1	$u_7(y)$
e_x	Ecuación 1				Ecuación 2

Nota 1 : En la estimación de Z_{xo}, si los valores obtenidos al inicio y al final de la calibración fuesen diferentes, se tomará el valor medio de los dos. Si la diferencia fuese significativa comparada con la incertidumbre total se incluirá una nueva componente de incertidumbre debida a la inestabilidad del cero.

Nota 2: Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de e_X, respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado.

Nota 3: $u_i(y) = c_i \ u(x_i)$

Cálculo de la incertidumbre expandida final (con nivel de confianza de aproximadamente 95%).

Considerando que todas las variables de entrada son independientes, que por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de propagación de varianzas de la referencia [2], y teniendo en cuenta que no es necesario determinar el número efectivo de grados de libertad, ya que se han realizado 10 medidas, la incertidumbre expandida tiene la siguiente expresión:

$$U = k \cdot u(e_x) = k\sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y) + u_4^2(y) + u_5^2(y) + u_6^2(y) + u_7^2(y)}$$

Si las componentes de incertidumbres u_4 y u_5 son muy significativas respecto a la incertidumbre total es conveniente determinar el número de grados efectivos de libertad. Este se determina de acuerdo al documento EAL-R2 apéndice E aplicando la siguiente ecuación:

$$\upsilon_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{\upsilon_i}}$$

Donde u(y) son las incertidumbres típicas y ν_i los grados de libertad correspondientes a la contribución $u_i(y)$. Generalmente para las contribuciones del tipo A el número de grados de libertad es el número de medidas realizadas menos una. Para las de tipo B se considera que es $\rightarrow \infty$.

Para este caso concreto la expresión sería:

$$\upsilon_{eff} = \frac{u^4(e_x)}{\frac{u_4^4(y)}{9} + \frac{u_5^4(y)}{9}}$$

Si el valor obtenido es superior a 50 la k que corresponde al 95% será 2, si por el contrario se obtiene un valor inferior el valor de k se obtiene de la tabla del citado anexo E. Por ejemplo para el caso ν_{eff}=20; k= 2.13.

6.2. Interpretación de resultados

Se deberán establecer en función del uso previsto para el puente, unos límites de tolerancia a partir de los cuales se realizará el ajuste del instrumento o se limitará el uso del mismo. Se procederá al ajuste cuando la desviación obtenida sea mayor que el límite de tolerancia establecido disminuido en la incertidumbre de calibración, siempre y cuando el cliente o usuario del instrumento así lo haya especificado.

Una referencia para establecer estos límites suele ser las especificaciones dadas por el fabricante, estableciéndose los límites en forma de porcentaje respecto a las mismas. Por ejemplo se procederá al ajuste si la desviación obtenida supera el 25% de las especificaciones de estabilidad a un año del instrumento. Estos límites siempre deberá establecerlos el cliente o responsable del instrumento.

Una vez terminada la calibración, incluyendo en su caso los ajustes necesarios, se determinarán los errores asociados a la calibración final en cada uno de los puntos, se determinará si dichos errores son inferiores al límite de tolerancia disminuido en la incertidumbre de calibración, y si es así el puente se destinará de nuevo a su uso planificado. En caso contrario se reparará o se estudiará la posibilidad de su empleo en una nueva aplicación que admita una tolerancia de uso mayor.

Si ha sido necesario realizar el ajuste, en el certificado de calibración correspondiente figurarán los valores obtenidos antes y después del ajuste.

El período de tiempo razonable para la recalibración de estos instrumentos es de 12 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente de las características técnicas comprobadas del instrumento (fundamentalmente su estabilidad), del uso que se realice del mismo, y de su tolerancia asignada. El usuario del equipo será siempre el responsable de asignar el período de recalibración, y de revisarlo cuando sea

preciso, considerando, por ejemplo, los resultados obtenidos con respecto a las calibraciones anteriores y a las tolerancias consideradas.

7. REFERENCIAS.

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración.

Manual de funcionamiento del puente.
Manuales o tablas de características de los patrones.

7.2. Otras referencias para consulta.

[1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. Diciembre 1994

[2] Guía EA-4/02 (rev.00)R2. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration..Diciembre 1999.

[3] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 1. 1998.

[4] Guide to the expression of uncertanity in measurement. ISO 1993. (ISBN92-67-10188-9).

[5] International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). JCGM 200:2008
.
[6] Quantities and units. ISO 31 1992

8. ANEXOS

Ejemplo de calibración

Se hace aplicación del procedimiento en uno de los puntos de calibración.
Se realiza la calibración de un puente, que según indica el fabricante tiene unas especificaciones de ±(0,25% + 1dígito), siempre que d $>$10 para resistencias y Q $>$ 10 para inductancias y capacidades y para una temperatura de funcionamiento de 23 °C ± 2 °C. El puente opera a una frecuencia de 1 kHz aplicando una tensión de 1 V. Dispone de la función “Zero”, que se realiza antes de las medidas. La calibración se efectúa en el laboratorio donde la temperatura es de 23 °C ± 1 °C. Se evalúa el punto de calibración de 1 kΩ.

Función de error de resistencia:

$$e_X = R_X + \delta R_X - (R_S + \delta R_{SD} + \delta R_{ST})$$

Asignación de las componentes de incertidumbre.

a. Incertidumbre de calibración de la resistencia patrón $u(R_s)$. Del certificado de la resistencia patrón se tiene a 23 °C y una frecuencia de 1 kHz el siguiente valor:

   1,000 02 kΩ ± 0,5 Ω para k=2 a la temperatura de referencia (23°C).

   Sabemos que para esta resistencia d $>$100.

$$u(R_s)=0{,}5\Omega/2$$

b. Incertidumbre asociada a la corrección por deriva de la resistencia patrón $u(\delta R_{SD})$. Del histórico de la resistencia obtenemos que la resistencia deriva linealmente y estimamos que su deriva desde la última calibración ha sido de + 0,01Ω. A esta estimación le

asignamos unos límites máximos de $\pm$ 0,2 Ω obtenida de la máxima desviación encontrada respecto a la recta.

$$u(\delta R_{SD}) = 0{,}2\Omega/\sqrt{3}$$

c. Incertidumbre asociada a la influencia de la temperatura sobre la resistencia patrón $u(\delta R_{ST})$. El coeficiente de temperatura de la resistencia es de 0,02 $\Omega\ K^{-1}$. Que supone una variación máxima de la resistencia debida a la temperatura de $\pm$ 0,04 Ω.

$$u(\delta R_{ST}) = 0{,}04\Omega/\sqrt{3}$$

d. Incertidumbre debida a la dispersión de lecturas del puente $u(R_x)$. Se ha obtenido una lectura de 1,000 1 kΩ . Las lecturas eran estables con un intervalo máximo de variación de $\pm$ 1d. Que equivale a $\pm$ 0,1 Ω.

$$u(R_x) = 0{,}1\Omega/\sqrt{3}$$

e. Incertidumbre debida a la resolución del puente a calibrar $u(\delta R_x)$ Resolución del puente $\pm$ 0,1 Ω.

$$u(\delta R_x) = = 0{,}1\Omega/\sqrt{3}$$

<u>Balance de las componentes</u>

Magnitud, X_i	Estimación	Incer. Típica (Ω)	Distribución de probabilidad	Coef.	Contribución incertidumbre (Ω)
R_s	1,000 02 kΩ	0,5/2	Normal	-1	$u_1(y)$ = - 0,25
δR_{SD}	0,01 Ω	0,2/√3	Rectangular	-1	$u_2(y)$ = - 0,12
δR_{ST}	0 Ω	0,04/√3	Rectangular	-1	$u_3(y)$ = -0,023
R_x	1,000 1 kΩ	0,1/√3	Rectangular	1	$u_4(y)$ = 0,06
δR_x	0 Ω	0,1/√3	Rectangular	1	$u_5(y)$ = 0,06
e_x	0,07 Ω				$u(e_x)$ = 0,29

Calculo de la incertidumbre expandida final

Considerando que, todas las variables de entrada son independientes y que por tanto no hay que tener en cuenta los coeficientes de correlación, y que la incertidumbre típica debida a la dispersión de las medidas se ha tomado como una distribución rectangular el número de grados efectivos de libertad será $\to \infty$. La incertidumbre expandida correspondiente a un nivel de confianza de aproximadamente el 95% corresponderá a k=2.

$$U = 2\ u(e_x) = 0{,}58\ \Omega$$

Expresión del resultado de la calibración

Los resultados de la calibración es conveniente expresarlos en forma de tabla para cada función, donde se indicará el valor aplicado, la lectura del instrumento, el error del instrumento y la incertidumbre asociada a la calibración. En el certificado se indicarán también todos los datos necesarios para la interpretación de los resultados tales como: Condiciones de operación del instrumento durante las medidas, realización de la función cero, temperatura de realización de las medidas, cables o tipo de cables utilizados etc.

Función resistencia
Condiciones de medida: circuito equivalente serie, “cero”, tiempo de integración “slow”

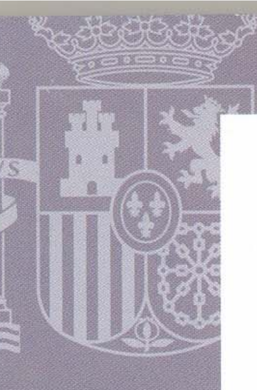
Campo	Valor aplicado f = 1 kHz	Indicación l instrumento	error	Incertidumbre (±) (k=2)
1 kΩ	1,000 03 kΩ d >100	1,000 1 kΩ	0,07 Ω	0,58 Ω

La incertidumbre expandida de calibración indicada, corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor k = 2, que para una

distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95% aproximadamente. La incertidumbre de medida ha sido determinada de acuerdo con la publicación EAL-R2.

Análisis de resultados

De los resultados obtenidos se desprende que el instrumento se encuentra dentro de las tolerancias especificadas y que por consiguiente no es necesario realizar el ajuste del mismo. En este caso la incertidumbre relativa de calibración es del 0.058 % del orden de cuatro veces inferior a lo especificado por el fabricante. La desviación encontrada esta dentro de la incertidumbre de calibración con lo que cumpliría con cualquier criterio en cuantos a límites establecidos para que no sea necesario realizar el ajuste.



NIPO: 706-08-007-9